微型真空計發展趨勢與校正

戴昌琨
工業技術研究院量測技術發展中心

摘要

真空量測技術是整個真空技術中重要的一環，真空量測儀器是真空系統的靈魂之窗，配合高科技的研發需求與新興微機電系統技術的發展，傳統式真空計也因而蛻變為微型真空計，以因應在工業製程中愈來愈嚴苛的量測需求。傳統設計方式要提昇真空量測儀器的性能相當有限，微機電系統技術的應用，大幅改進了真空量測儀器的功能，也突破了以往難以克服的技術瓶頸。

一、前言

真空量測需求以目前科技發展現況而言，涵蓋範圍由超高真空(10^{-11} Pa；10^{-13} Torr)至大氣壓力(10^{5} Pa；760 Torr)，範圍寬廣達10的16次方；量測此壓力範圍的真空量測儀器，由於氣體分子呈現之物理特性不同，無法以單一物理原理來量測全部壓力範圍，到目前為止尚無任何一種真空計可以量測由10^{-11} Pa之超高真空範圍到一大氣壓，因而產生了許多類型真空計，用來量測不同範圍之壓力大小。

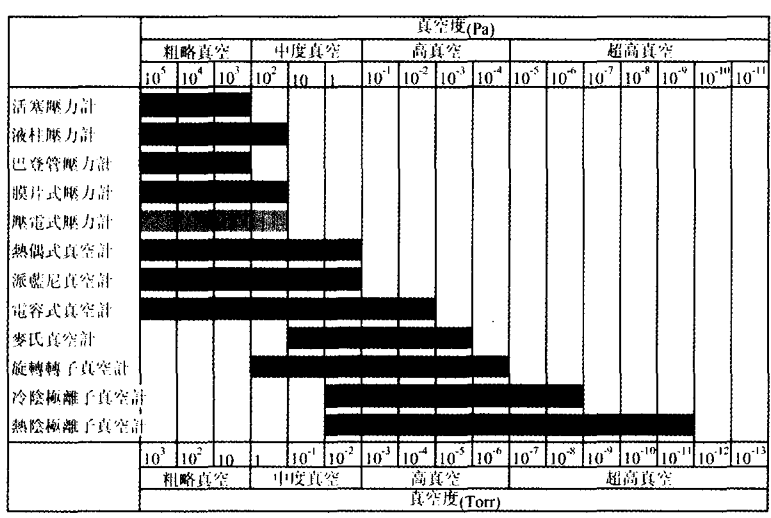
真空計依學理方式分類之方法眾多[1-3]，量測實務上則依工作方式分類為直接式與間接式2種，直接式真空計有：巴登管式(Bourdon Tube)、膜片式、電容式、…等類型真空計，其壓力讀值與量測的氣體種類無關；間接式真空計有：熱偶式、派藍尼(Pirani)、離子式、…等類型真空計，其壓力讀值與量測的氣體種類有關，因此必須針對不同之氣體作必要的修正，通常在無特別註明時，讀值以空氣（或氮氣）為使用之量測氣體。

正確地選用真空計是非常重要的，不能僅考慮真空計適用的壓力範圍，還必須考慮環境條件（溫溼度、震動、噪音、…）與工作介質（造成污染、腐蝕破裂、…）等其他因素；除了經費與投資效益等非儀器因素外，後勤支援（如：檢修難易度、保養花費時間、維修費用、元件替換性、功能擴充性、…）也是重要的考慮因素之一。實務經驗顯示：膜片式、熱傳導式、彭甯(Penning)冷陰極離子式等3種真空計在工業上使用最普遍；高精度真空計對工作環境要求較嚴格，使用上受到的限制也多。

二、真空量測儀器的發展

真空量測儀器從十七世紀托里切利(Torricelli)首先發明氣壓計(Barometer)開始，到十九世紀麥可雷歐德(McLeod)發明麥氏真空計(McLeod Gauge)[4]；之後由於電燈的發明，帶動了真空幫浦與真空計的發展；二次世界大戰後，隨著工業快速發展與研究興盛，陸續研發成功現今商業化之各式真空計。

如前所述，不同的真空計其使用範圍不同（如**表一**所示），工作人員必須對各式真空計有基本的了解，才能正確地使用真空計；通



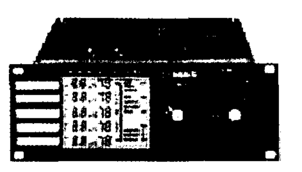
表一 真空計的使用範圍

常發生操作不當時，再好的保護裝置依然無法保護真空計免於受損。為了使真空計更易於使用，結合2個以上感測頭於一體的全域型（原文為Full Range或Combination）真空計（如圖一）便應運而生。全域型真空計設計之著眼點為：可由大氣壓力量測至高真空（甚至超高真空），避免人員操作不當造成的損失。由於將原有2個以上的控制器及感測頭合併為一個控制器與感測頭，除了降低成本及使用空間外，利用自動化電路設計，使真空計能在不同真空度自動切換與啟閉，有效降低真空計損壞機率；此種趨勢使真空計由單一個體發展為組合式真空計。

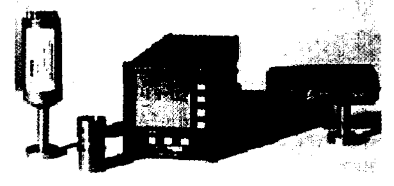
今日高科技產業（如：半導體、薄膜電晶體液晶顯示器(TFT-LCD)、生物科技、…）對於製程要求愈來愈嚴苛，現有的傳統真空計之設計方式，已不能符合未來真空量測性能需求；解析度高、精度佳、可靠且穩定的真空計才能符合未來的量測需求，再配合有效利用無塵室以降低成本，新型態真空計必須朝小型化及模組化方向發展—利用微機電系統(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)技術來發展新型態微型真空計(Micromachined Vacuum Gauge)，已是目前世界各國真空量測儀器研發最新趨勢。

三、微機電系統(MEMS)技術

以微電子技術和微加工技術為基礎的新興技術—微機電系統技術，乃是用矽的微加工方法來製作感測器和控制器；微機電感測器的發展在全球市場上十分看好，它不僅可大量製造使其價格降低，且未來可能進一步取代傳統



(a)顯示器



(b)感測器及其顯示器

圖一 全域型真空計（取材自MKS Instruments 網頁資料）

感測器，在更多的領域中被充分應用。全球感測器市場在1995年約為60億美元，其中利用微機電系統技術製造的產品約佔25 %（15億美元）[5]。在2002年依據歐洲NEXUS Task Force的預測，市場金額預估可達380億美元；再依據美國System Planning Corporation的預測，每年市場需求成長預估20 % ～ 30 %，由此可見微機電系統技術的巨大影響力及其高經濟價值！

感測器市場若依使用之物理參數來區分，與真空壓力相關之感測器佔有比率高達40 %，主要應用於兩大方面：(1)多功能絕對壓力感測器—利用它來嚴格監控汽車引擎內之油氣混合比例，提高燃燒效率來降低油料耗損，既環保又可解決石油危機；(2)醫療處理用壓力感測器—使用微機電系統技術生產的壓力感測器，不需使用前校正而且穩定性高，低成本的設計使測量血壓所需費用大幅降低。

利用微機電系統技術大量生產伴隨的價格優勢，成功取代傳統感測器市場的機會相當大，未來隨著其模組化元件的逐步開發，將由單一感測元件發展為多樣化的儀器和系統。

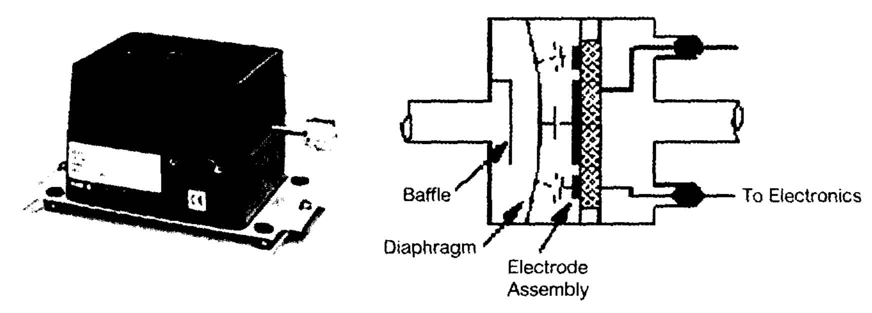
四、新型態微型真空計

微型真空計的設計須符合三高（解析度高、準確度高、可靠度高）的要求並結合其優勢—價格低、安裝易、耐用且好維修（甚至免維修），目前在小型化、操作範圍擴大及智慧型能力提昇上已有相當多的進展，以下就一般常用類型之真空計作一闡述：

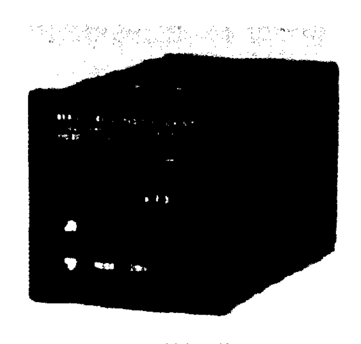
4.1 電容式真空計及其微小化

電容式真空計的參考壓力端是抽真空($<10^{-5}$ Pa；$<10^{-7}$ Torr)後封閉，金屬薄膜的量測壓力端與待測物連接，利用薄膜變形產生之位移轉換為電子訊號，經電子電路以數位顯示壓力值[6]。早期的電容式真空計在量測接近大氣壓力時，由於薄膜裝置快速疲乏致無法正確量測壓力，且薄膜容易受溫度影響而使零點飄移；經改良後，單邊電極的設計（如圖二）使其適用於各種製程條件之氣體，不再限用於乾燥惰性氣體[7]。

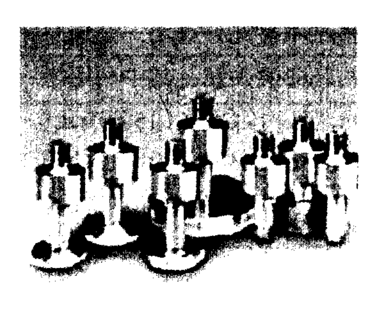
微小化電容式真空計目前分為兩種類型：壓阻式(Piezoresistive Type)（如圖三）及容電式(Capacitive Type)（如圖四），在製程中通常要求真空計精度高且動態量測範圍寬廣，目前商品化的壓阻式真空計價格低但精度不高，主要原因乃其感測膜片面積較一般電容式真空計小很多，因而其靈敏度也不高，但是相較於傳統的壓阻式真空計、派藍尼真空計及對流式(Convection)真空計，微機電系統技術的應用還是讓它出色不少；容電式真空計則精度較高但動態量測範圍偏窄，改進的方法乃利用靜電伺服(Electrostatic Servo)的微機電系統技術[8]，來擴展容電式真空計動態量測範圍不足的



圖二　電容式真空計的外觀及結構示意圖（取材自MKS Instruments網頁資料）

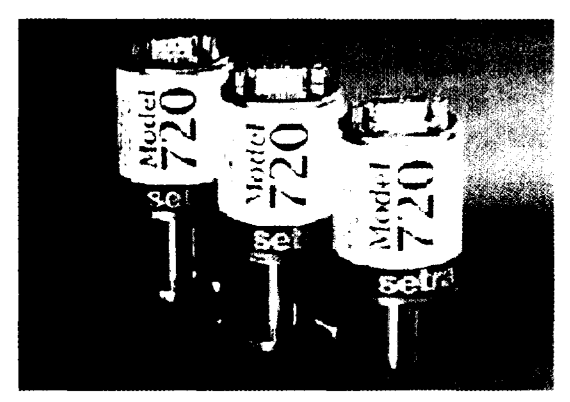


(a)顯示器



(b)感測器

圖三　壓阻式真空計（取材自Teledyne Hastings Instruments網頁資料）



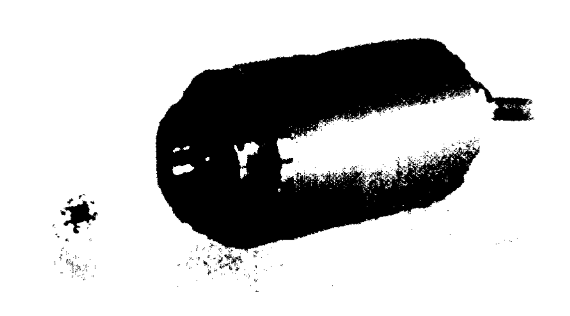
圖四　容電式真空計（取材自Setra Systems, Inc.網頁資料）

問題。

4.2 熱傳導式真空計及其微小化

熱傳導式真空計包括派藍尼(Pirani)、熱偶式(Thermocouple)以及熱敏電阻式(Thermistor)等三種真空計，均利用氣體與壓力相關之熱導性(Thermal Conductivity)來間接量測壓力。依據傳統式真空計的使用經驗，10^{-2} ～ 10^{-1} Pa (10^{-4}～10^{-3} Torr)此段壓力範圍是非常不易精確量測的，因為不論是使用傳統式派藍尼真空計或離子式真空計，皆無法提供足夠的精度，傳統式派藍尼真空計在壓力大於10^{3} Pa (10 Torr)以上，其靈敏度明顯不足，傳統離子式真空計則不適用於10^{-2} Pa (10^{-4} Torr) 以上之壓力量測。對流式真空計雖然改善了傳統式派藍尼真空計在高壓時靈敏度的問題，但其精度差且反應時間太長，顯示仍有許多待改進之處。

利用微機電系統技術來研製之微型熱傳導式真空計，通常可降低熱功率與電源之消耗，並提高反應速度，近年來相關之研究甚多[9-11]，以微型派藍尼真空計（如圖五）之技術成熟度最高，目前已發展到解析度達0.1 %，重複性(Reproducibility)在操作範圍內可達1 %，操作範圍也從傳統式的1 ～ 10^{4} Pa (10^{-2} ～ 10^{2} Torr)擴展至10^{-3} ～ 10^{5} Pa (10^{-5}～10^{3} Torr)。感測元件的幾何形狀及結構的改變，使感測所



圖五　微型派藍尼真空計（取材自Wenzel Instruments網頁資料）

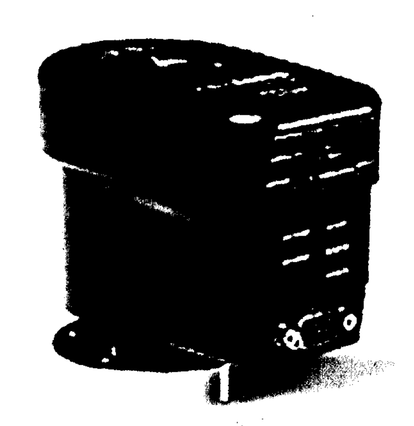
需之氣體體積及熱變化量大幅減少，反應速率大幅提高，環境條件（溫度、震動、重力、…）惡劣對其功能的影響，也較傳統式派藍尼真空計小甚多；傳送器方式的設計，使遠距離（~100公尺）觀測讀值輕而易舉，精度也從10 ～ 25 %躍升為5 %，並排除了感測器裝設需固定方向的困擾。目前在市場上已有多種商品化之微型熱傳導式真空計開發成功上市。

4.3 離子式真空計及其微小化

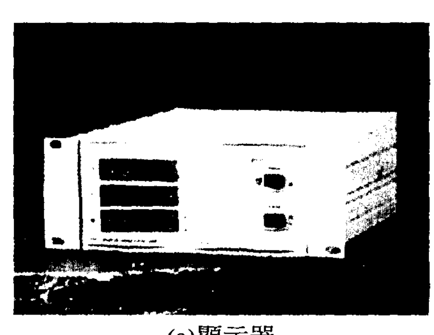
離子式真空計可分為熱陰極與冷陰極兩大類，一般泛稱之離子真空計通常均指熱陰極離子真空計。熱陰極離子真空計依其結構不同又可分為傳統型、B-A(Bayard-Alpert)型、改良B-A型、S-P型(Schulz-Phelps)、…等等，工作原理乃利用加熱之燈絲放出電子，經電場加速撞擊氣體分子使其離子化；冷陰極離子真空計依其結構不同又可分為彭甯型、引發式彭甯型、磁電管型、倒位磁電管型、…等等，工作原理乃在高強度之電場下產生自發性的持續放電作用而放出電子。

離子式真空計是高真空量測的不二選擇，幾乎所有的高真空系統皆使用它來進行高真空量測，離子式真空計數年來在理論發展上無任何突破，商業應用上則利用微機電系統技術使其微小化，其製造過程與一般半導體製程類似，成品之量測範圍更廣且不需修改便能快速使用。以B-A型離子真空計為例，傳統的量測範圍可從超高真空至~ 10^{-3} Pa (~ 10^{-5} Torr)，微型B-A離子真空計則可由超高真空操作至~ 10^{-1} Pa (~ 10^{-3} Torr)，微型離子真空計（如**圖六**）與傳統離子真空計有相同的技術困難點：熱陰極容易被燒毀，目前在此方面之研究尚無任何重大進展。

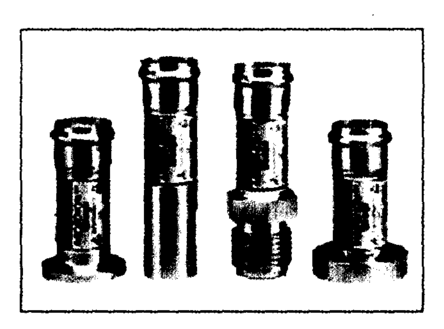
冷陰極離子真空計在傳統的印象中，總認為其準確度不如熱陰極離子真空計，實際上兩者的準確度幾乎旗鼓相當，以倒位磁電管型冷陰極離子真空計（如**圖七**）為例，在10^{-7} ～ 5×10^{-1} Pa (10^{-9} ～ 5×10^{-3} Torr)量測範圍內之重現性(Repeatability)可達±5 %，與玻璃管熱陰極離子真空計相同【12-14】。



圖七　倒位磁電管型冷陰極離子真空計（取材自MKS Instruments網頁資料）



(a)顯示器



(b)感測器

圖六　微型離子真空計（取材自Helix Technology Corporation網頁資料）

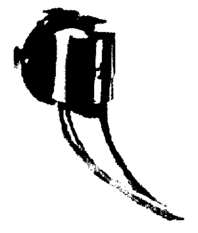
五、真空計校正技術

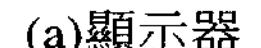
真空計的校正方法可由真空計校正設備的發展過程中了解其模式，早期以與絕對式真空計（如：麥氏真空計）連接比較為主要模式，再逐步發展為校正裝置本身可產生已知的壓力模式[15]。兩真空計直接連接比較使用的比較校正法，在執行上較容易，且作業所需時間短，能涵蓋的校正範圍足夠寬廣，在應用上屬廣泛採用的校正方法。目前提供真空計校正與量測能力的國家中，使用比較校正法的國家佔52 %以上[16]，雖然此法產生的量測不確定度比絕對校正法大，依然為多數國家級實驗室所採用，且前述之優點顯示其重要性依然存在；在工業應用上比較校正法當然是唯一且最佳的選擇，滿足快速、簡易且經濟的目標。

目前先進之國家（如：美、英、德）已建立完成之真空原級標準器，其不確定度可達0.3 %至1.6 %，但是在傳遞標準時使用之轉移標準器，卻因其精度與穩定度均明顯不高的情況下，使得標準無法精確地傳遞，1979年以前真空標準國際比對使用之轉移標準器為熱陰極離子真空計，即使經過追溯校正後，熱陰極離子真空計儀器本身由於不穩定就會導入5 %至10 %之不確定度，相較於原級標準器的不確定度明顯偏高甚多；1980年以後改用旋轉轉子真空計(Spinning Rotor Gage)（如**圖八**）為轉移標準器，旋轉轉子真空計經過追溯校正後，導入之不確定度在1.5 %至1 %之間，較熱陰極離子真空計之不確定度好10倍之多，但旋轉轉子真空計存在著穩定度不足的技術瓶頸—每年飄移可達1 %。

校正技術的最新發展趨勢乃研製新型式之旋轉轉子真空計，其量測範圍可由傳統的10^{-4} ～ 1 Pa (10^{-6} ～ 10^{-2} Torr)擴展為10^{-7} ～ 1 Pa (10^{-9} ～ 10^{-2} Torr)，訴求重點為量測範圍向下擴展到超高真空；在穩定度方面可由現在的每年飄移1 %降為0.5 %[17]。此外在最近的真空標準國際比對(CCM.P-K4以及CCM.P-K5)中，除了使用電容式真空計為轉移標準器外，還併用新開發的共振式矽基真空計(Resonant Silicon Gauge)為轉移標準器，目前初步比對結果顯示共振式矽基真空計的穩定度相當理想，未來的發展值得進一步觀察。







(a)顯示器　　(b)感測器

圖八　旋轉轉子真空計（取材自MKS Instruments網頁資料）

六、結論

綜觀真空量測儀器由以往發展至今之趨勢，可發現微機電系統技術的影響是非常明顯的，不論是生產製程上使用之量測儀器到高精度之校正儀器，甚至未來國際比對使用之轉移標準器，都因微機電系統此項新興技術的發展與介入而有極大的變化。如同全域型真空計的發展，微型真空計也已然跨入組合式真空計的發展模式；若不考慮微型真空計內是由幾種感測元件所組合而成的話，買一個商品化真空計可由超高真空量測到一大氣壓的夢想是可以實

現的。

七、參考文獻

1. 國科會精密儀器發展中心 "實用真空技術" 精密儀器發展中心出版，九十年七月初版.
2. 蘇青森 "實用真空工程學 上冊" 正中書局，七十五年十二月初版.
3. 呂登復 "實用真空技術" 國興出版社，八十五年六月再版.
4. Theodore E. Madey, J. Vac. Sci. Technol. **A2(2)**, 110 (1984)
5. J. Bryzek, Sensors and Actuators **A 56**, 1-9 (1996).
6. J.J. Sullivan, J. Vac. Sci. Tech. **A 3(3)**, 1721-1730 (1985).
7. N. Peacock and R. Waits, Solid State Technology **45(1)**, 58-62 (2002).
8. Y. Wang and M. Esashi, Sensors and Actuators, **A 66**, 213 (1998).
9. E. H. Klaassen and G. T.A. Kovacs, Sensors and Actuators, **A 58**, 37-42 (1997).
10. J. S. Shie, B. C. S. Chou and Y. M. Chen, J. Vac. Sci. Technol. **A 13(6)**, 2972-2979 (1995).
11. W. J. Alvesteffer, D. C. Jacobs and D. H. Baker, J. Vac. Sci. Technol. **A 13(6)**, 2980-2985 (1995).
12. B.R.F. Kendall, J. Vac. Sci. Technol. **A 17(4)**, 2041-2049 (1999).
13. D.L. Hyatt and N.T. Peacock, "Long Term Measurement of an Inverted Magnetron Cold Cathode Gauge", Proceedings of the 37th Technical Conference, Society of Vacuum Coaters, 409-412 (1994).
14. R.N. Peacock, N.T. Peacock and D.S. Hauschulz, J. Vac. Sci. Technol. **A 9(3)**, 1977-1985 (1991).
15. K. F. Poulter, A. Calcatelli, P. S. Choumoff, B. Iapteff and G. Messer, J. Vac. Sci. Technol. **17(3)**, 679-687 (1980).
16. Visit the Web site of Asia-Pacific Metrology Programme (APMP) Technical Committee for Mass and Related Quantities (TCM) at www.irl.cri.nz/teams/msl/APMP_TCM.htm
17. Visit the Web site of National Institute of Standards and Technology (NIST), Chemical Science and Technology Laboratory, FY 2001 Technical Activity Reports - Process Measurements Division(836) at www.cstl.nist.gov/fy2001tar.htm

